

Présentation AFTES – 08/10/24
Evolution des méthodologies d'utilisation des explosifs
en travaux souterrains



Un rapide sentiment de notre métier

Particularité des Travaux Souterrains

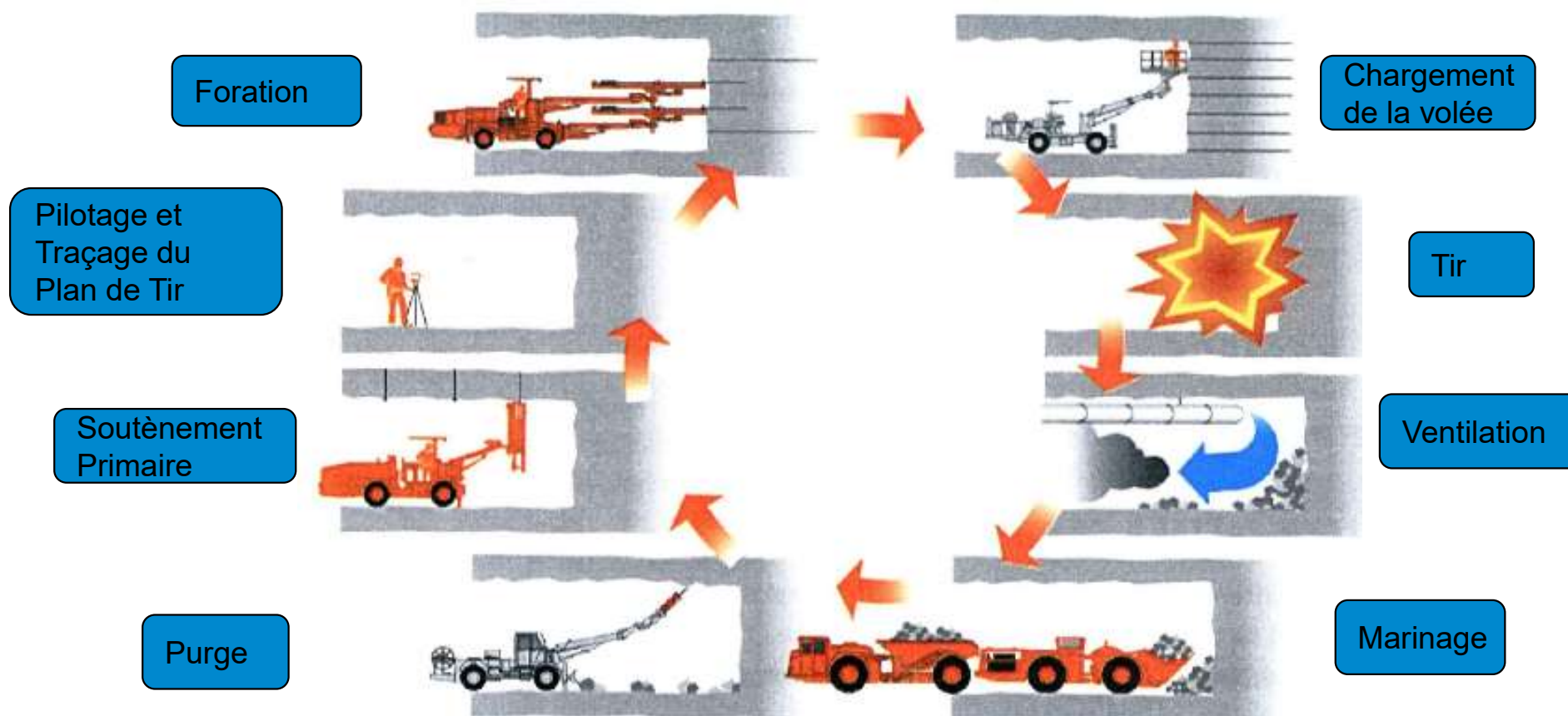
→ Travail humain en milieu confiné :
pollution, bruit, pénibilité, danger, sécurité...

→ Connaissance toujours imparfaite du milieu :
terrains non homogènes, continus et isotropes,
aléas à ne pas sous-estimer

→ Ouvrages souvent linéaire :
Notion de cycle

L'ensemble des critères précités sont accrus sur des sites d'excavation à l'explosif et la suite de la présentation a pour objectif de l'illustrer

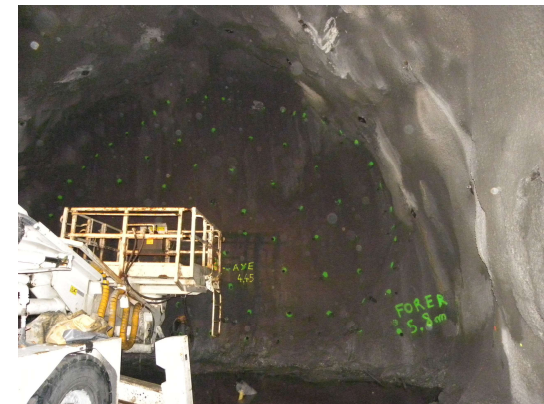
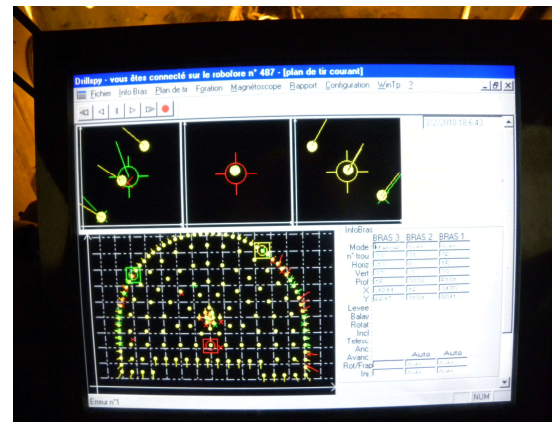
L'utilisation des explosifs : une des spécificités de la méthode conventionnelle



Foration de la volée

Implantation de la volée // Plan de foration

- Traçage manuel par le chef d'équipe
- Projection de plan de tir théorique au moyen d'un appareil optique installé en galerie type rétroprojecteur
- Plan de tir mémorisé dans un logiciel de perforation automatique au moyen d'un ordinateur embarqué sur le jumbo de foration = possibilité de définir la séquence de foration
- Mise en station du jumbo via un système laser + cibles embarquées et renseignement du topographe
- Mise en station assistée par scanner du jumbo vis-à-vis des précédentes volées et ajustement pour récupération des sous-profils / hors-profils



Foration de la volée



Utilisation d'un Jumbo de foration manuel, semi automatisé ou automatisé à 1, 2, 3 ou (4 bras) de foration

- Longueur des trous définie par la longueur de la volée (passe d'excavation)
- Un seul opérateur manipule l'engin assisté du chef d'équipe pour sa mise en station (et quelques opérateurs durant la phase de relevage ; opération qui pourrait encore être améliorée)
- Foration à l'eau
- Les bras évoluent simultanément chacun dans un secteur défini au préalable et selon une certaine séquence (plan de cheminement des bras)



Foration de la volée – Rendements estimatifs

- Cas d'une volée de 4m de longueur / 150 trous pour 85 m² / Jumbo 3 bras
- 1,5 à 2 m / min / bras (4m / min en pointe)
- +/- 1,5 heure de foration pure
- **Durée d'une séquence complète entre 2 et 3 heures** => le delta est conséquence du type de pilotage utilisé (automatique ou manuel) et de l'état du parement des volées précédentes, tout en intégrant le facteur humain malgré tout



Foration de la volée

Les outils de foration

Emmancement : connecteur entre marteau hydraulique et barre de foration = sortie male en générale

Manchons : connecteur entre l'emmanchement et la barres « femelle/femelle »

Barre de foration : ronde ou hexagonale, creuse, longueur en adéquation avec la glissière et la longueur de la volée souhaitée,
Filetage en extrémité, de type « male/femelle » ou « male/male »

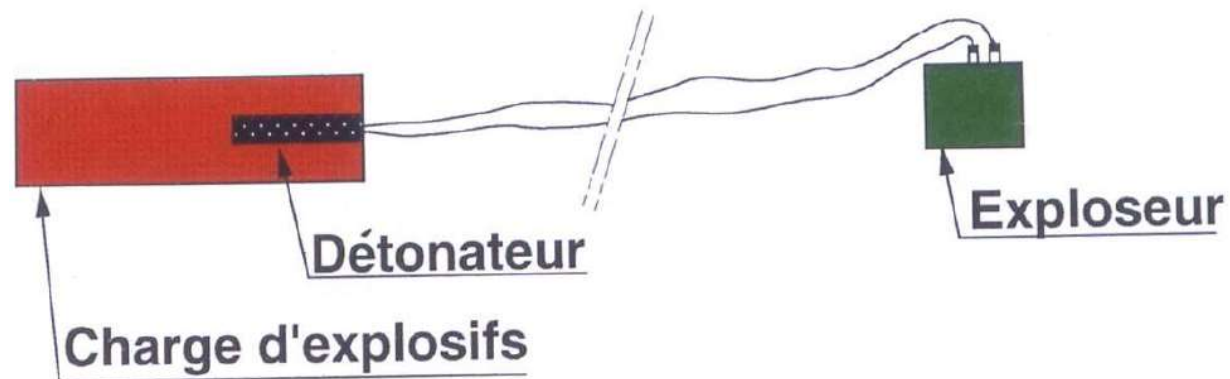
Taillant : tête de forage, picots en carbure de tungstène, trous pour foration à l'eau / (à l'air beaucoup plus rare)



Notions d'explosif

La chaîne pyrotechnique

- Les dispositifs d'amorçage
- Les explosifs
- Les dispositifs de mise à feu



Les dispositifs d'amorçage = Les détonateurs

Détonateurs électriques (2€/u – ordre d'idée) – en voie de disparition
avec l'émergence des détonateurs non-électriques

- à court retard (micro retard)

Tous les 25 millisecondes N° 1 à 20

- à retard ordinaire demi-seconde

Tous les 500 millisecondes N° 0 à 12

Détonateurs non électriques « NONEL » (4€/u – ordre d'idée)

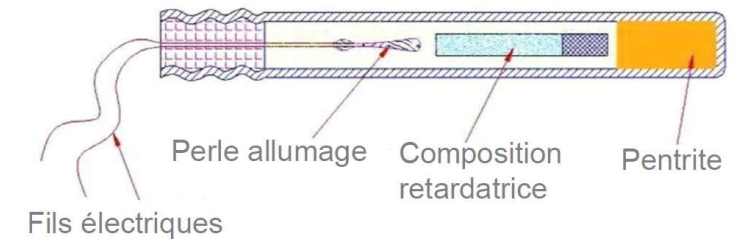
- à court retard (micro retard)

Tous les 25 millisecondes N° 1 à 20

- à retard ordinaire de 500ms à 7500ms

Détonateurs électroniques (15€/u – ordre d'idée)

Programmables avec une console sans limite de capacité ou de définition de retard



Les dispositifs d'amorçage = Les détonateurs

Entreposage de détonateurs à la poudrière chantier

- Etagères avec compartiments
- Rangement par numéro et par type de détonateur (retard et court retard)
- Les détonateurs sont parfois rangés également dans une pièce spécialement dédiée, protégée par alarme, détecteurs d'intrusion, de fumée... suivant les exigences de l'arrêté préfectoral d'autorisation de dépôt.



Transport des détonateurs sur site

- Cantines métalliques
- Habillage intérieur et cloisonnement bois



Les dispositifs de mise à feu

Electrique

Exploseur pour tir séquentiel électrique

Planchette de raccordement



Non électrique

-pistolet (starter) ou détonateur électrique pour déclencher onde de choc
+ raccords



Electronique

Exploseur pour tir séquentiel électronique type console de programmation



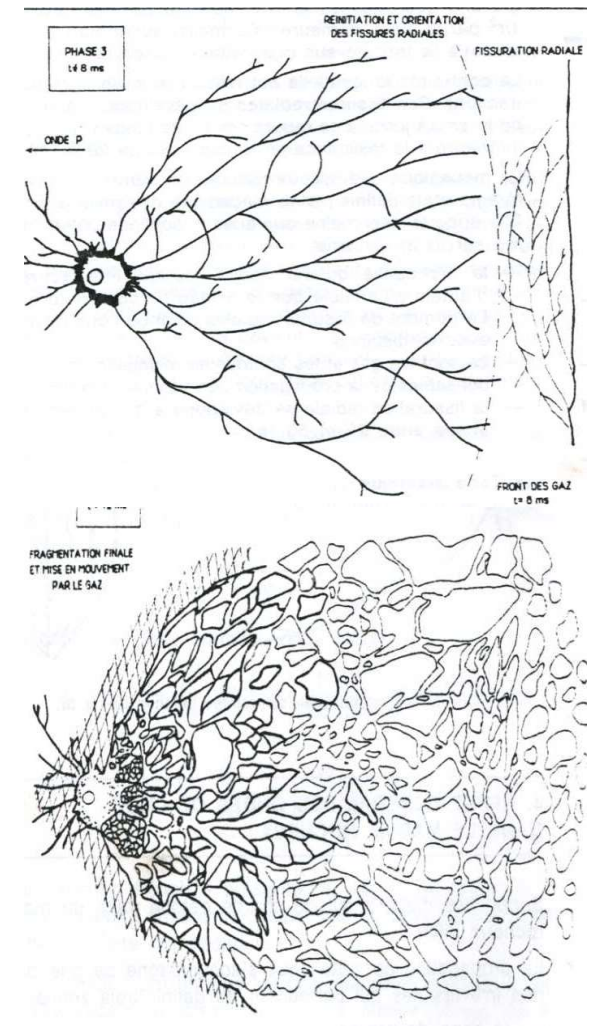
Les explosifs

Définition : mélanges susceptibles de se décomposer très rapidement (de l'ordre de la milliseconde) en libérant brutalement une grande quantité d'énergie sous forme :

- **d'une onde de choc** parcourant la charge d'explosif et qui se transmet au terrain encaissant en le fracturant et le cisailant
- **de gaz à très haute pression** dégagé brutalement et sous haute pression qui vont ouvrir les fissures en disloquant le terrain et en assurant son foisonnement

En travaux souterrains les explosifs les plus couramment utilisés sont :

- **encartouchés**
- **pompables**



Les explosifs

Les Différentes Familles :

- **Les dynamites**, explosifs à base de nitroglycérine, sensibles aux chocs, aux frottements, à la chaleur ou au froid et au vieillissement. En voie de disparition au profit des émulsions explosives.
- **Les émulsions explosives**, encartouchés ou en vrac (déversables ou pompables), sont produits également insensibles à l'eau et très peu sensibles aux chocs.
- **Le cordeau détonant**, utilisé principalement au droit du découpage / périphérie pour « cisailler » le terrain, est un produit également insensible à l'eau mais sensible aux chocs.
- **Les nitrates encartouchés**, explosifs à base de nitrate d'ammonium ayant une résistance à l'eau médiocre et dégageant de fumées toxiques. En voie de disparition au profit des émulsions explosives.
- **Les gels**, explosifs, le plus souvent encartouchés, insensibles à l'eau et très peu sensibles aux chocs. Ces produits ont tendance à disparaître du marché au profit des émulsions explosives.



Les explosifs les plus courants

Encartouchés : Dynamite

Mélange de nitrate d'ammonium, nitroglycéroglycol imprégnant un matériau support



DYNAMITE

- vitesse de détonation 6500 à 7500 m/s
- énergie de choc 2.38 Mj/kg
- énergie de gaz 2.09 Mj/kg

Pompables : Emulsion

Solution aqueuse de nitrate d'ammonium en émulsion (classe 5.1) : matrice $d = 1.4$
Le produit explosif est obtenu par l'incorporation de réactifs gazéifiants ramenant la densité entre 0.9 et 1.1



EMULSION

Vitesse de détonation 4500 à 5500 m/s
Énergie de choc 1.5 Mj/kg
Énergie de gaz 1.5 Mj/kg

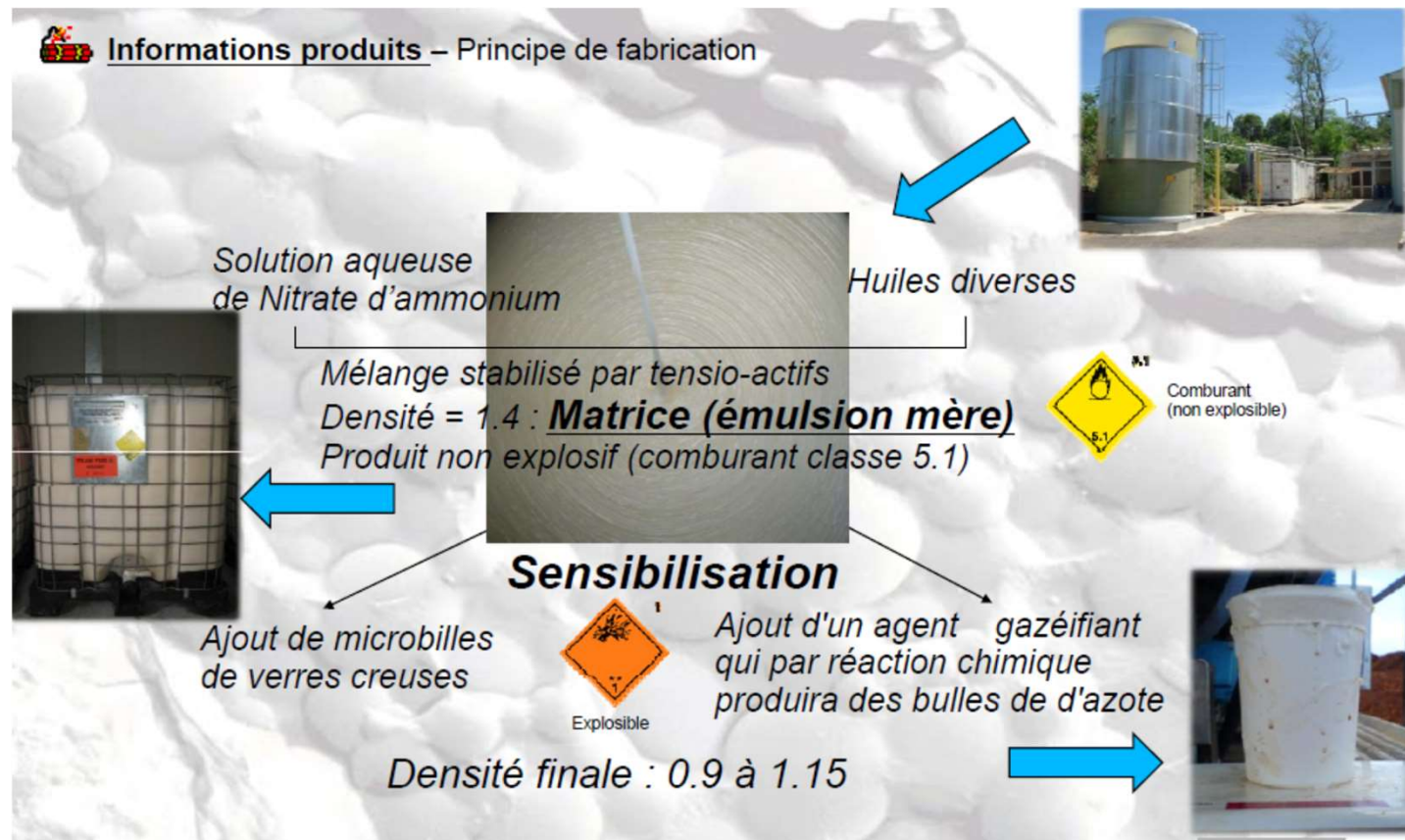
Préparation de précharges

- Etabli en bois
 - Eclairage et chauffage anti-déflagrant
 - Dispositif d'alerte (alarme)
 - Personnel habilité et spécialement formé
-
- Mise en place des cartouches dans les tubes
 - Extrémité de la cartouche laissée apparente pour faciliter la mise en place au front du détonateur
 - Ruban adhésif à chaque extrémité pour maintenir les cartouches

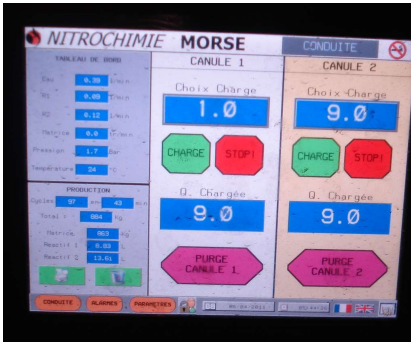
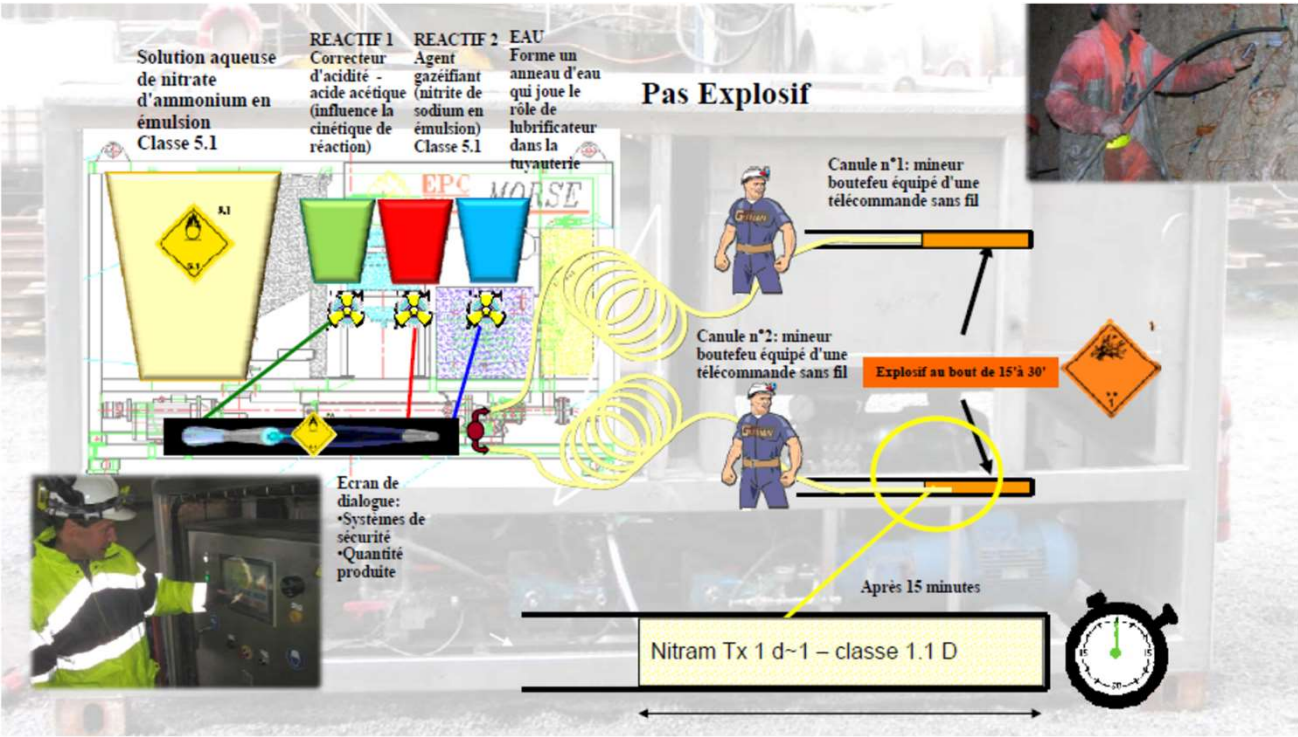


Le principe MORSE – la révolution des années 2010

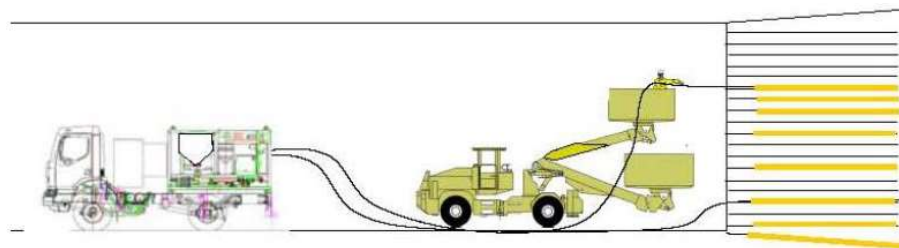
Les émulsions pompées sont aussi appelées « système M.O.R.S.E » : **MO**dule de **Re**pompage et de **Sensibilisation** d'**Emulsion**)



Le principe MORSE



L'Unité Mobile de Fabrication d'Explosifs (UFME)



Le principe MORSE – Stockage des produits

Le système M.O.R.S.E. contribue :

- à l'amélioration des conditions de **sécurité** (très forte réduction de la manipulation des produits pyrotechniques)
- à l'amélioration des conditions de **sûreté** (réduction très importante du risque de détournement de produits pyrotechniques du chantier)
- à l'amélioration de la productivité (facilité de chargement, gain de temps)
- à la réduction des coûts de minage (diminution du nombre de trou, suppression des ateliers de pré charges, **stockage des produits pyrotechniques sur site réduit à son strict minimum**).



Le principe MORSE – Avantage / Inconvénients

	UMFE	Explosifs encartouchés	commentaires
Prix du produit	Moins élevé mais plus de quantité	Plus cher mais moins de quantité	Intégrer location matériel et coût opérateur.
Artifices de tir	Détonateur NONEL conseillé mais détonateurs HI également utilisés	Tradition française de l'utilisation du HI	
Installations	Hangar chauffé compatible produit classe 5A	Installation protégées si dépôt, ICPE Local précharges assimilé à un dépôt de 2 ^{ème} catégorie	
matériel	Location de l'UMFE avec technicien habilité du fournisseur	Pas d'intervention de tiers	Obligation réglementaire d'avoir le technicien du fournisseur.
Personnels nécessaires		2 personnes à la préparation des précharges	
Prix global au m3 excavé			Cf. REX chantier
Possibilité tir séquentiel grde section	Oui et plus facile avec du NONEL	oui	
Rendement des tirs	identique	identique	L'énergie au m3 est la même. Cf. REX Modane
Nocivité	Plus de gaz Précaution à prendre-dégagement ammoniac au contact du béton	Moins de gaz	Brumisation et arrosage du tas de marin après tir.
Temps de mise en œuvre	identique	identique	Les nouvelles unités de pompage seront dotées de deux pompes. A terme le morse sera plus rapide
Mise en œuvre	Beaucoup plus simple : Pas de soufflage des trous	Difficulté dans les terrains bouillants	Adopté par tous les mineurs de la profession. Aucun nouveau chantier en encartouché depuis 2007.

	UMFE	Explosifs encartouchés	commentaires
fonctionnement	En principe meilleur en raison du meilleur découplage avec le terrain. L'énergie de choc est intégralement transmise au terrain	Moins bon découplage : Il y a un vide entre la cartouche et le terrain	
Gain de temps envisageable	Sous réserve du respect des seuils de vibration : Possibilité de forer en 63 voir plus et faire moins de trous => gain sur la foration et les artifices	non	Evolution actuelle
Restrictions techniques	Forte venue d'eau cf. SALAZIE, communication entre les mines	non	
Sécurité pour les mineurs	<ul style="list-style-type: none"> Les composants sont des produits de classe 5A – dangerosité équivalente au GO Explosif actif après avoir été injecté dans la mine Peu d'imbrulé En cas de raté : lavage à l'eau* Désactivation du produit dans le temps 	<ul style="list-style-type: none"> Temps de présence humaine au front supérieur. Présence d'imbrulé 	
précautions	Gants et lunettes – pas de contact avec la peau et les yeux.	Idem – risque de projection lors du soufflage des trous	
Contrôle des quantités	aisé	Pas facile - pas de contrôle des imbrulés	
Traçabilité		Le nouvel arrêté du 5 mars 2009 impose une identification des cartouches à l'unité, code barre !!!!	ATTENTION
Restriction réglementaire		Fortes contraintes sur dépôt ou local précharge assimilé souvent à un dépôt ou une ICPE – local de conditionnement	Développé ci-dessous

Le principe MORSE – Nouvelle application

Compte tenu des avantages précités, notamment vis-à-vis des conditions de transport et stockage sur site, les possibilités du système MORSE ont été poussées.

Les dernières évolutions permettent la substitution du cordeau détonant au découpage par l'application d'une quantité d'émulsion répartie de manière plus linéaire et contrôlée sur les mines correspondantes => moins d'explosif proprement dit à stocker à la poudrière avec uniquement les boosters.



Le plan de chargement

A retenir

Mines de bouchons :

- Les plus chargées (entre 3 kg et 9 kg)
- Micro retard = détonations très rapprochées
- Maillage serrée (0.5 x 0.5m)
- Présence de trous de décompression (Diam 127mm)

Mines d'abattage :

- Chargées « normalement » (entre 2kg et 8 kg)
- Courts retards (retards normaux)
- Maille standard (1.00m x 1.00m)

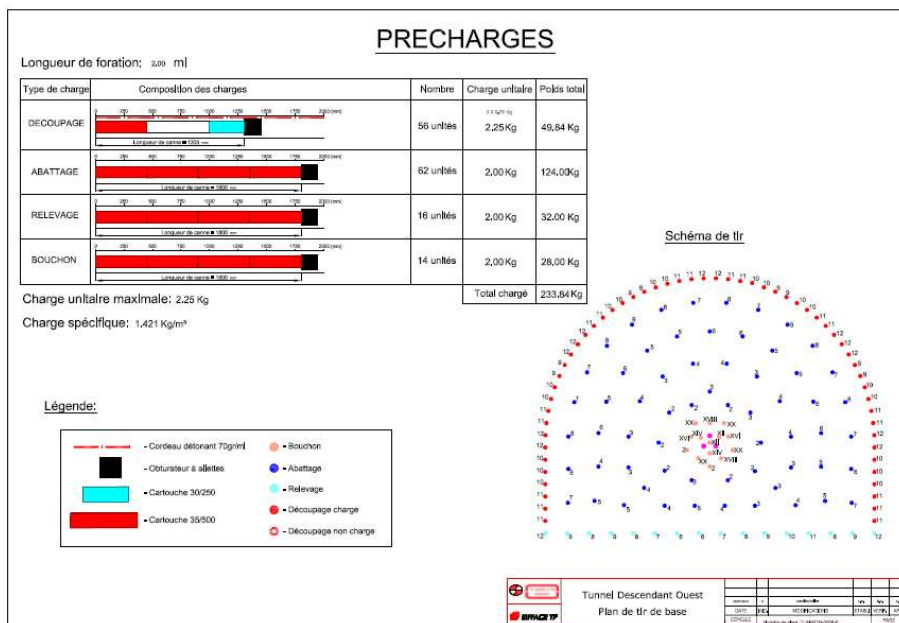
Mines de post découpage :

- Faiblement chargées (autour de 1 kg)
- Courts retards (retards normaux) / possibilité de cumul des charges
- Maillage serrée (0.5 x 0.5m)

Mines de relevage:

- Chargées identiquement au bouchon
- Courts retards (retards normaux)
- Même maille que les mines d'abattage

Quantité d'explosif pour une section de 90m2 = 120 kg/m



Longueur des forages	2,00 m	3,00 m	4,00 m	5,00 m	5,80 m
Quantité total d'explosif	264,54 kg	429,30 kg	594,06 kg	758,82 kg	890,63 kg
Bouchon	2,53 kg	4,34 kg	6,15 kg	7,96 kg	9,41 kg
Abattage	2,17 kg	3,98 kg	5,79 kg	7,60 kg	9,05 kg
Relevage	2,53 kg	4,34 kg	6,15 kg	7,96 kg	9,41 kg
Découpage *	1,14 kg	1,21 kg	1,28 kg	1,35 kg	1,41 kg
Grammage pour une surface du front de 83,00 m²	1,59 kg/m3	1,72 kg/m3	1,79 kg/m3	1,83 kg/m3	1,85 kg/m3
Volume marinage	166,00 m3	249,00 m3	332,00 m3	415,00 m3	481,40 m3

Chargement de la volée



Besoin d'avoir du personnel formé => CPT + options associées

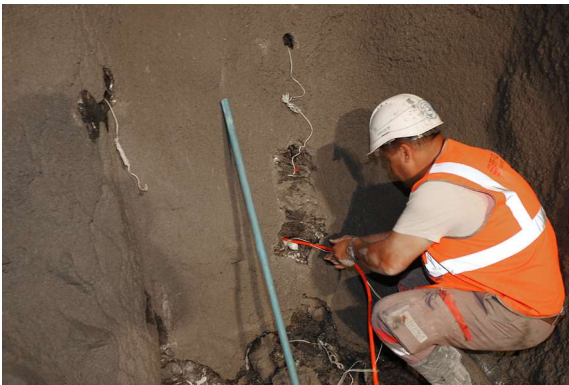
Un seul responsable de l'ensemble de l'opération de chargement jusqu'à la mise à feu de la volée = le boutefeux ou chef mineur (en principe chef de chantier ou chef d'équipe) :

- trace le plan de raccordement au front si nécessaire
- met en place tous les détonateurs

Pour une section de 90m² environ , nécessité de 5 mineurs pour le chargement
Mise en place des détonateurs dans les précharges et introduction des précharges dans les trous de mines

3 mineurs sur nacelle de chargement en hauteur
2 mineurs pour le chargement à hauteur d'homme

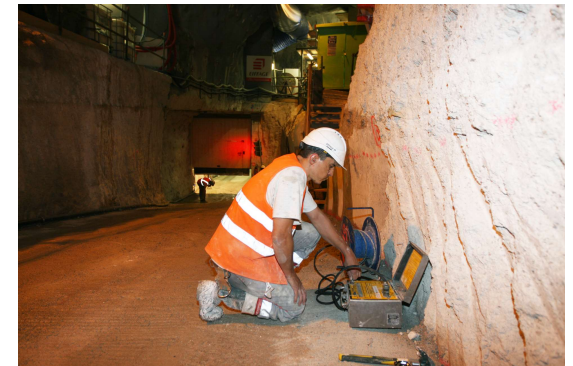
Durée du chargement = +/- 1.50 heures



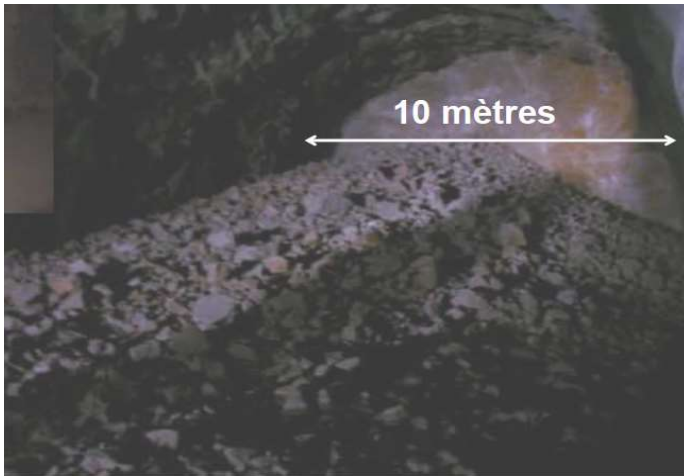
Chargement de la volée



Raccordement et mise à feu



Résultat de la volée

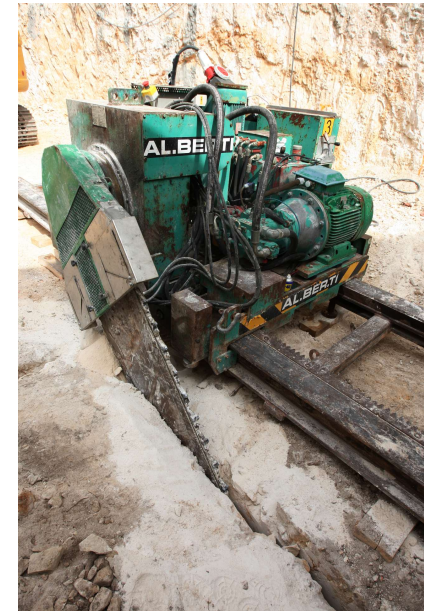


Avantages / Inconvénients

Méthode compétitive en terrain rocheux pour des linéaires courts
Grande souplesse d'adaptation aux terrains (section divisée)
Volume abattu : de l'ordre de 450m³ par volée.

Deux difficultés majeures :

- **Sécurité au front et stabilité de l'excavation**
(méthodologie rigoureuse et purge minutieuse)
- **Nuisances de l'explosif sur l'environnement**
(bruits, poussières, gaz nocifs, vibrations, surpressions aériennes)



Merci de votre attention

